

УДК 621.9.06

Ю. Кузнєцов¹, докт. техн. наук; Д. Дмитрієв², канд. техн. наук¹Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”²Херсонський національний технічний університет

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ФОРМОУТВОРЮЮЧИХ РУХІВ МЕХАНІЗМАМИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ У ВЕРСТАТАХ НОВИХ КОМПОНОВОК

Наведено класифікацію механізмів паралельної структури. Запропоновано програмний модуль для керування, кінематичного аналізу та візуалізації рухів верстатів нових компонок. Наведено результати тестування програмного модуля для верстата типу гексапод при обробці різних поверхонь та запатентованого токарного верстата на базі механізмів паралельної структури.

Yu. Kuznetsov, D. Dmitriev

VISUALIZATION OF SHAPE GENERATING MOTIONS BY THE MACHANISM OF PARALLEL STRUCTURE IN THE MACHINE TOOLS OF NEW STRUCTURAL CONFIGURATIONS

Based on the parallel mechanism, a new technological machine is presented in this paper. The virtual prototype modelling and the kinematic simulation parallel milling cone surface are described. The virtual prototype simulation can help in the parametric design and the structural design for the new machine tool.

Актуальність досліджень. Однією із світових тенденцій верстатобудування є створення нових компонок верстатів з мехатронними елементами, що об'єднують засоби механіки, електроніки та електротехніки [1, 2], тому перспективним напрямком удосконалення механізмів технологічного обладнання є їх побудова на основі: передачі потоку рухів і сил декількома кінематичними ланцюгами шляхом раціонального перерозподілу рухів та навантажень між ними; реалізації паралельної передачі енергії декількома кінематичними ланцюгами та механізмами; створення замкнених кінематичних ланцюгів, які відтворюють замкнений контур підвищеної жорсткості; побудови безконсольних конструкцій механізмів.

Постановка проблеми. Удосконалення, створення та проектування високоефективних механізмів може формуватись на наступних положеннях (рис.1). Послідовне, паралельне та паралельно-послідовне з'єднання (рис. 2) і розташування механізмів у структурі технологічного обладнання у загальному енергетичному потоці від ведучої до веденої кінематичної ланки впливає майже на всі параметри функціонування технологічного обладнання: точність позиціонування, жорсткість, динамічні характеристики, коефіцієнт корисної дії (ККД) [3].

Розглянемо вплив відповідного з'єднання механізмів на коефіцієнт корисної дії механічної системи технологічного обладнання для послідовного з'єднання n механізмів $M_1...M_6$ (рис.2, а) з коефіцієнтом корисної дії $\eta_1... \eta_6$.

Перший механізм M_1 витрачає роботу сил A_1 та виконує роботу, яка визначається за формулою:

$$A_2 = A_1 \cdot \eta_1. \quad (1)$$

Другий механізм M_2 витрачає роботу рухомих сил A_3 та виконує роботу

$$A_3 = A_2 \cdot \eta_2 = A_1 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2. \quad (2)$$



Рисунок 1 – Вимоги та принципи побудови високоєфективних механізмів

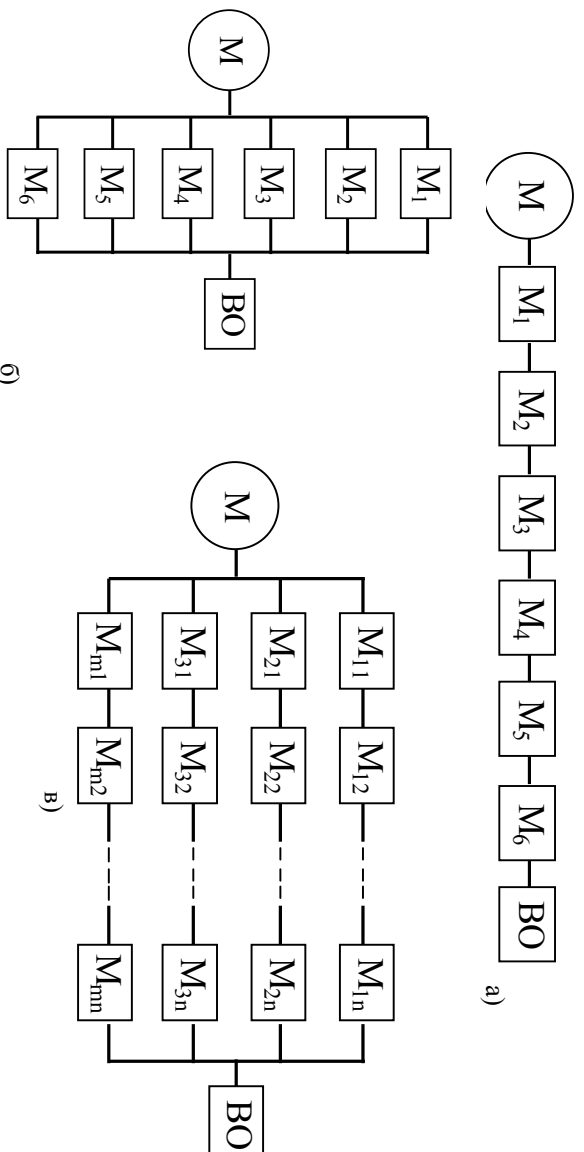


Рисунок 2 – З'єднання механізмів: а) послідовне; б) паралельне; в) паралельно-послідовне

У цьому випадку корисна робота A_n системи механізмів з послідовним з'єднанням:

$$A_n = A_1 \prod_{i=1}^n \eta_i, \quad (3)$$

а загальний ККД відносно енергетичного потоку визначається за формулою:

$$\eta = \frac{A_n}{A_1} = \prod_{i=1}^n \eta_i. \quad (4)$$

При паралельному з'єднанні m механізмів $M_1 \dots M_m$ (рис.2, б) кожний k -й механізм системи витрачає роботу рухомих сил A_k та виконує корисну роботу:

$$A_{mk} = A_k \cdot \eta_k. \quad (5)$$

Загальна робота рухомих сил, яка витрачається усіма механізмами, визначається як:

$$A = \sum_{k=1}^m A_k. \quad (6)$$

Корисна робота, яку виконує система механізмів з паралельним з'єднанням механізмів,

$$A_m = \sum_{k=1}^m A_k \eta_k, \quad (7)$$

а загальний ККД визначається як:

$$\eta = \frac{A_m}{A} = \frac{\sum_{k=1}^m A_k \eta_k}{\sum_{k=1}^m A_k}. \quad (8)$$

При паралельно-послідовному з'єднанні механізмів (рис.2, в) розглядають окремі ділянки ланцюгів, які мають паралельне або послідовне з'єднання, ККД яких слід враховувати за відповідними формулами. Після чого, залежно від структури з'єднань механізмів, визначається загальний ККД.

Загальний ККД системи механізмів, з'єднаних паралельно-послідовно, визначається за формулою:

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^m A_{nk}}{\sum_{k=1}^m A_k} = \frac{\sum_{k=1}^m A_k \prod_{i=1}^n \eta_{ki}}{\sum_{k=1}^m A_k}, \quad (9)$$

де n – кількість механізмів, з'єднаних послідовно у паралельних ланцюгах;

m – кількість паралельних ланцюгів.

Отже, ККД системи механізмів паралельного з'єднання буде більшим за величиною, ніж системи механізмів, з'єднаних послідовно та паралельно-послідовно.

Аналіз попередніх досліджень. Порівняльний аналіз механізмів за їх послідовним та паралельним з'єднанням показує, що найбільш ефективно функціонують останні, які дозволяють зменшити енергетичні втрати на переміщення рухомих мас виконавчих органів, забезпечити мінімальну матеріалоємність та збільшити коефіцієнт корисної дії.

Подібні механізми мають визначені переваги у порівнянні з традиційними механізмами, основними з яких є: використання кінематичних ланок у вигляді стрижнів, які працюють як на розтягування, так і на стискання при відсутності напруг згину; можливість розташування виконавчих органів на нерухомих або на елементах, що рухаються повільно; застосування рухомих елементів мінімальної маси, які витрачають незначні потоки для переміщення виконавчого органа; використання

незамкнених стрижневих систем при паралельній передачі створює жорстку просторову ферму; раціоналізації розподілу напрямків та величин навантаження дозволяють зменшити енергетичні витрати та забезпечити мінімальне навантаження на кінематичні ланки та приводи; мінімізація кількості з'єднань елементів та кінематичних ланок механізму, що зумовлює зменшення пружних деформацій, підвищення жорсткості системи, а також реалізує високу точність позиціонування виконавчого органа та поліпшує динамічні характеристики технологічного обладнання.

Вимоги сучасної технології задовільняє технологічне обладнання, побудоване на основі механізмів паралельної структури, яке слід розглядати не як модернізацію існуючого металообробного обладнання, а як впровадження нових нетрадиційних принципів проектування сучасного технологічного обладнання [2-4].

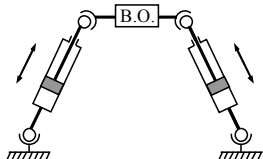
Кожне технологічне обладнання має характерний параметр - робочий простір. Саме робочий простір відрізняє вид обладнання від інших та зумовлює технологічні можливості. Робочий простір металообробних верстатів визначається робочим простором деталі та інструмента, а за формою та розмірами він залежить від конструктивних форм деталі і інструмента, їх розмірів, кількості та напрямків координатних переміщень, а також характеру формоутворюючих рухів виконавчих органів, а саме: для однокоординатного переміщення форма робочого простору визначається прямою лінією (свердлильне обладнання); для двохкоординатного переміщення (токарне обладнання) – площиною; для трьохкоординатного переміщення (фрезерне обладнання) – паралелепіпедом.

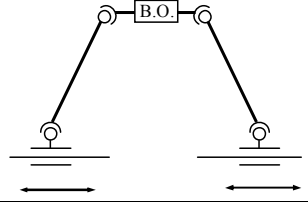
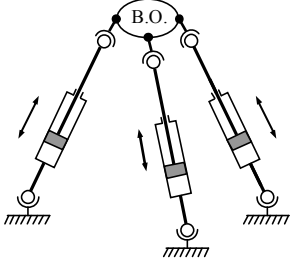
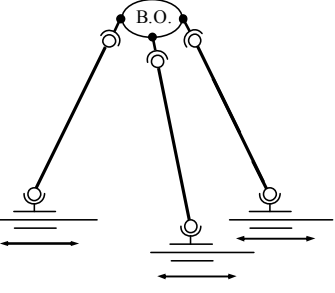
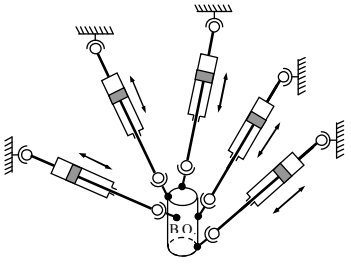
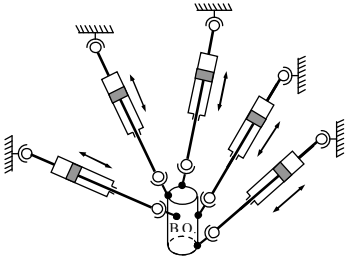
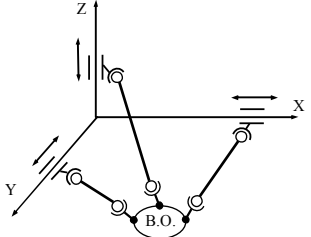
Робочий простір технологічного обладнання з паралельною кінематикою неможливо визначити однозначно. Його форма, розміри та положення змінюються при зміні положення виконавчого органа, а об'єм невеликий у порівнянні з габаритними розмірами обладнання. Відомі спроби аналізу і візуалізації рухів виконавчих органів верстатів з паралельною кінематикою в програмних середовищах Solid Works, Maple, MSC/ADAMS [5]. Авторами [6] запропоновано окремий програмний комплекс "Гексапод". Кожне програмне забезпечення має свої переваги і недоліки.

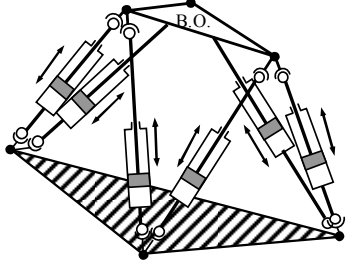
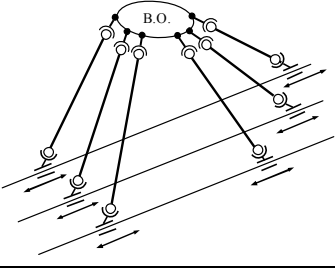
Мета і задачі досліджень. Для цілеспрямованого проектування просторових механізмів паралельної структури необхідно розробити наочне інтерактивне комп'ютерне середовище, що дозволить визначити рухи, різні положення механізму та сили, які діють в його елементах [2]. Необхідно мати поглиблений аналіз просторових кінематичних ланцюгів та механізмів, а саме: аналіз умов обертальності; можливості попадання в "особливі", в тому числі "мертві", положення; можливості розгалуження рухів; можливості введення додаткових закріплень, без порушення рухомості механізму.

Механізми паралельної структури представляють собою принципово новий клас просторових механізмів, фізична сутність яких полягає у тому, що рухомий виконавчий орган (ВО) технологічного обладнання шарнірно зв'язаний з його нерухомим елементом (стаціонарним блоком) кінематичними ланцюгами, кожний з яких має індивідуальний привід або накладає визначену кількість зв'язків на переміщення виконавчого органа (табл.1).

Таблиця 1 – Класифікація механізмів паралельної структури

| Термін | Визначення технологічного обладнання з паралельною кінематикою | Схема |
|--------|---|---|
| Біпод | будова на основі кінематичного з'єднання двох штанг змінної довжини |  |

| | | |
|-----------|--|---|
| Біглайд | будова на основі кінематичного з'єднання двох штанг постійної довжини |  |
| Трипод | будова на основі кінематичного з'єднання трьох штанг змінної довжини |  |
| Триглайд | будова на основі кінематичного з'єднання трьох штанг постійної довжини |  |
| Пентапод | будова на основі кінематичного з'єднання трьох основних та двох додаткових штанг змінної довжини |  |
| Пентапод | будова на основі кінематичного з'єднання трьох основних та двох додаткових штанг змінної довжини |  |
| Ортоглайд | будова на основі кінематичного з'єднання трьох штанг постійної довжини з ортогональним розташуванням напрямних |  |

| | | |
|------------|--|---|
| Гексапод | будова на основі кінематичного з'єднання шести штанг змінної довжини |  |
| Гексаглайд | будова на основі кінематичного з'єднання шести штанг постійної довжини |  |
| Дельта | будова на основі кінематичного з'єднання штанг, які виконані у вигляді паралелограмного механізму, а перетворення рухів реалізується шляхом примусового обертання опорних шарнірів, змонтованих на нерухомому стаціонарному блоці |  |
| Ножиці | будова на основі кінематичного V-подібного з'єднання двох прямокутних пластин, а перетворення рухів реалізується шляхом використання додаткових кінематичних ланок з штангами змінної довжини, шарнірно з'єднаних з рухомим або нерухомим елементами механізму |  |

Верстати паралельної структури на відміну від традиційного металообробного обладнання не мають матеріальних координатних напрямних (триподи, гексаподи, ножиці), а тільки віртуальні. Саме це ускладнює оцінку конфігурації оброблюваних поверхонь заготовки та раціональне її розміщення у межах робочого простору обладнання. Відповідні формоутворюючі рухи виконавчих органів реалізуються шляхом математичного програмування.

Враховуючи накопичений досвід комп'ютерного моделювання формоутворюючих рухів механізмів паралельної кінематики, на кафедрі "Конструювання верстатів та машин" НТУУ "КПІ" спільно з кафедрою "Технологія машинобудування" ХНТУ створено програмний модуль у тривимірному графічному середовищі 3DStudioMAX для керування, кінематичного аналізу і візуалізації рухів верстатів нової компоновки. Вибір програмного середовища зумовлено наявністю гнучкої об'єктно-орієнтованої мови програмування MaxScript, суміщеної з графічним простором моделювання. Створено інтерфейс програми, який дозволяє керувати положенням і орієнтацією виконавчого органа як за принципом прямої кінематики, так і зворотною кінематикою. Тривимірна модель верстата, а саме рухома платформа, місця з'єднання шарнірів, штанг, їх довжина і положення зв'язані змінними, математичними залежностями, що впливають на властивості об'єктів моделі за допомогою контролерів: Scriptcontroller, Position Expression, Path Constrain, Attachment, LookAt Constrain. Зміна положення й орієнтації виконавчого органу автоматично викликає розрахунок змінних і встановлення кінематичних ланок у потрібне положення

або відповідну довжину штанг. Запропонований програмний модуль доволі гнучкий і дозволяє: обирати структуру механізму, тобто штанги змінної або постійної довжини (біпод або біглайд, трипод або триглайд і т. ін.) без змін у конструкції моделі верстата; задавати траєкторію руху ВО обиранням потрібного сплайну безпосередньо в тривимірному просторі; обирати характер руху ВО уздовж просторової траєкторії, тобто слідування ВО з орієнтацією осі інструмента по нормалі до оброблюваної поверхні або положення рухомої платформи паралельно нерухомій основі; виконувати запис анімації створених технологічних рухів верстата; отримувати числові дані про довжину штанг, положення опор і шарнірів у системі координат верстату, кути Ейлера для кінематичних ланок, кути між штангами механізму; отримувати траєкторії будь-якої характерної точки кінематичних ланок механізму, наприклад габаритів рухомої платформи механізму, а також сліди штанг при русі ВО за заданою траєкторією.

Тестування програмного модуля виконано для верстата типу гексапод на операції контурного фрезерування конічної поверхні по типових траєкторіях «спіраль» (рис.4), «зигзаг по меридіанах» (рис.5), «зигзаг по сімейству гіпербол» (рис.6), асимптотами яких є крайні твірні конуса.

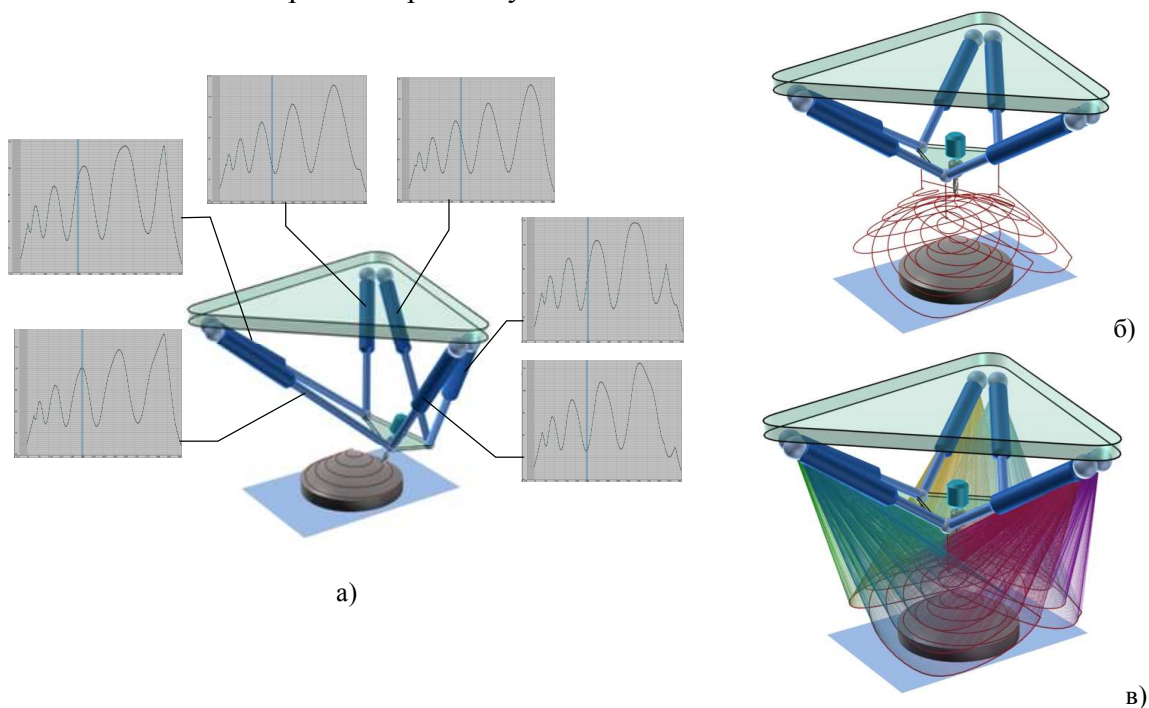
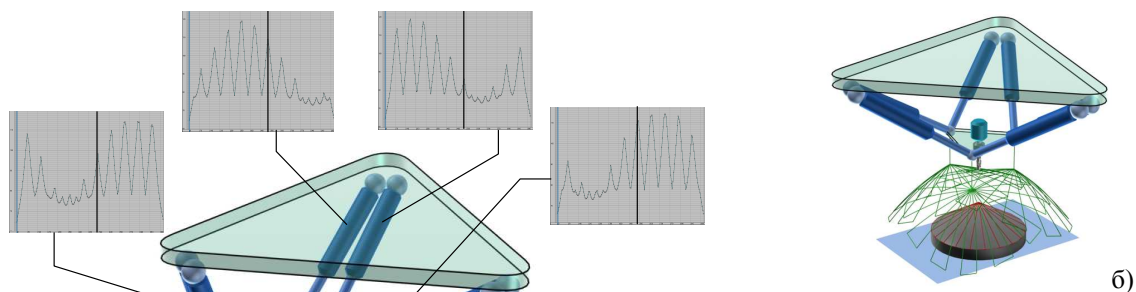
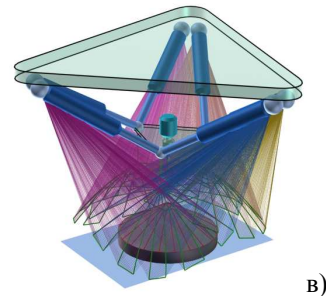


Рисунок 3 – Моделювання обробки фрезеруванням конічної поверхні по спіралі верстатом- гексаподом:
а) графіки змін довжини кожної штанги; б) траєкторії руху шарнірів рухомої платформи;
в) сліди штанг гексапода при заданому циклі обробки

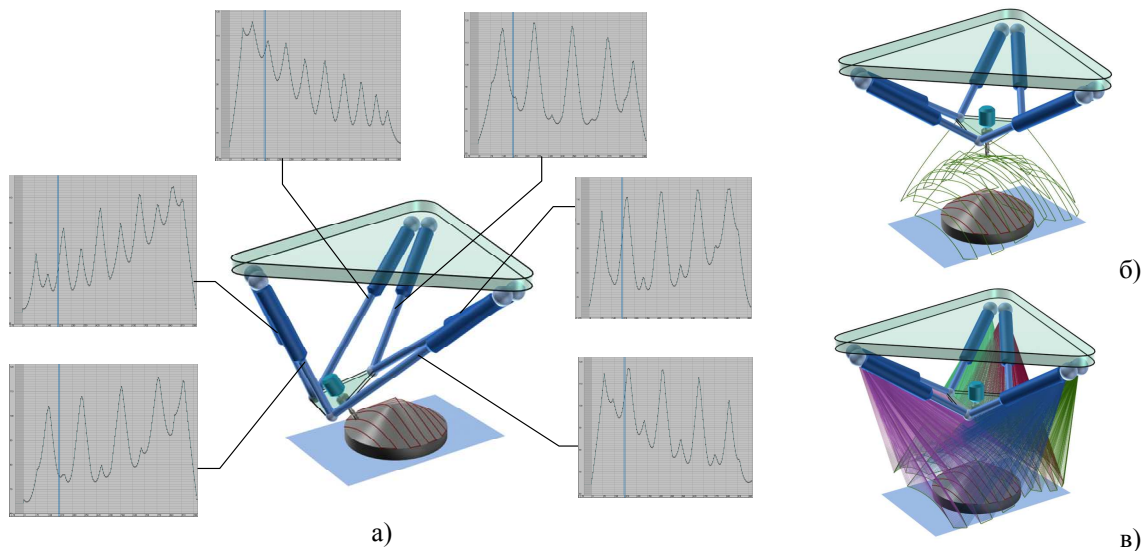




в)

Рисунок 4 – Моделювання обробки верстатом-гексаподом фрезеруванням конічної поверхні по меридіанах: а) графіки змін довжини кожної штанги; б) траєкторії руху шарнірів рухомої платформи; в) сліди штанг гексапода при заданому циклі обробки

Розробленою програмою виконано моделювання обробки ступеневого валу на токарному верстаті, показаному на рис. 6. Револьверну головку з інструментом розташовано на корпусі рухомої частини, що встановлено на чотирьох штангах А, В, С і D постійної довжини. Кожна штанга шарнірно зв'язана верхнім кінцем із корпусом рухомої частини, а нижнім – із власним сферичним шарніром, що встановлено на рухому частину окремого механізму поздовжньої подачі на напрямних верстата.



а)

б)

в)

Рисунок 5 – Моделювання обробки верстатом-гексаподом фрезеруванням конічної поверхні по гіперболах: а) графіки змін довжини кожної штанги; б) траєкторії руху шарнірів рухомої платформи; в) сліди штанг гексапода при заданому циклі обробки

Для поздовжньої подачі нижніх кінців кожної штанги по напрямних верстата використовуються кульково-гвинтові передачі. За рахунок зміни положення нижніх кінців штанг відбувається переміщення і обертання рухомої платформи відносно координатних осей верстата X, Y, Z.

При тестуванні наведеного верстата нової компоновки виконувались рухи ВО для контурної і позиційної обробки, що складається з п'ятих переходів (рис.7).

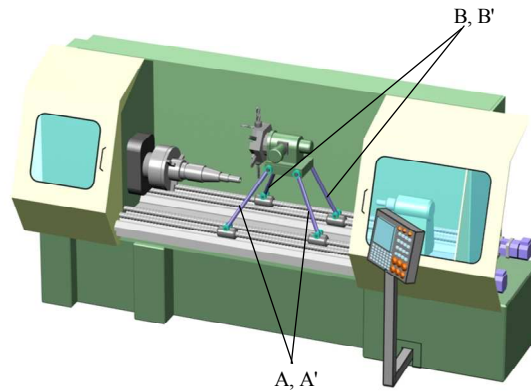


Рисунок 6 – Токарний верстат з виконавчим органом виконаним на базі механізмів паралельної кінематики "біглайд"

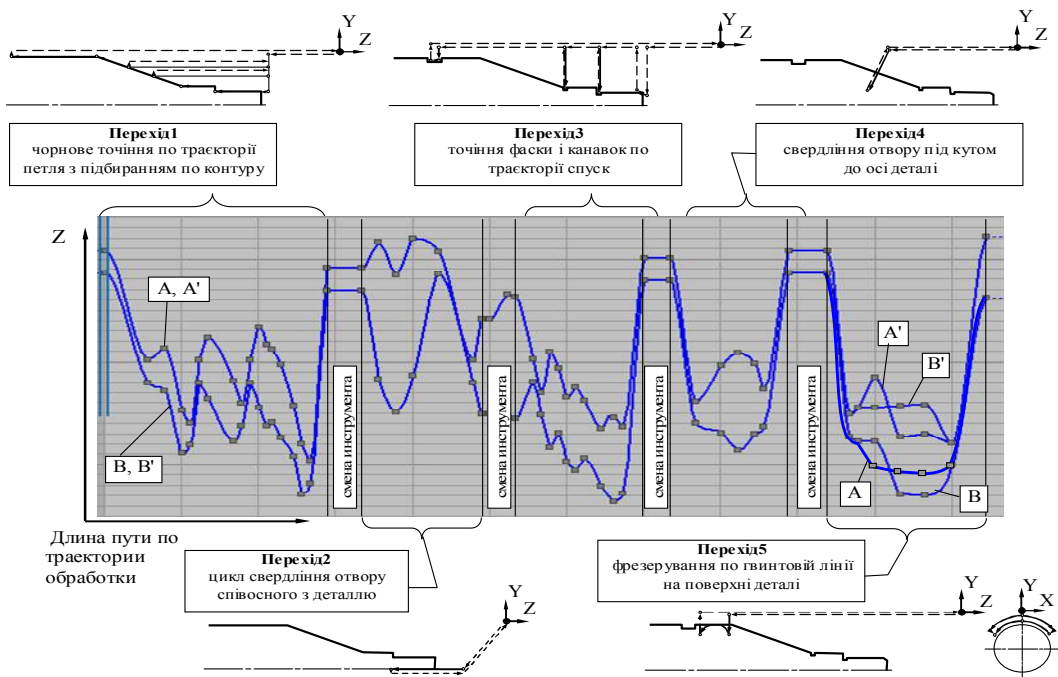


Рисунок 7 – Відносні переміщення опор штанг A, B, C і D за координатою Z при обробці ступеневого вала

Отримані числові значення збільшень по координаті Z кожної штанги при роботі системи ЧПК у відносних координатах.

Висновки. Розроблено ієрархічну комп'ютерну модель механізмів паралельної структури, яка реалізується засобами об'єктно-орієнтованого програмування. Реалізовано типові технологічні переходи об'ємної обробки за траєкторіями «спіраль» і «зигзаг» по конічній поверхні з оцінкою робочого простору верстата типу гексапод.

Напрямки подальших досліджень. Розроблений програмний модуль керуванням тривимірної моделі в подальших дослідженнях планується удосконалити алгоритмами силового статичного і динамічного аналізу, деталізувати шарнірні з'єднання для аналізу їх поведінки, реалізувати інтерфейс обміну даними з постпроцесором САМ-модуля і системою числового програмного керування верстатами нової компоновки.

Література

1. Кузнецов Ю.М. Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування в Україні // Збірник наукових праць за матеріалами науково-методичної конференції "Проблеми фізико-математичної і технічної освіти і науки України в контексті євроінтеграції (Вища освіта-2006)".- К.: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2007. – С.45 -55.
2. Обработкающее оборудование нового поколения. Концепция проектирования / В.Л. Афонин, А.Ф.Крайнев, В.Е. Ковалев и др./ Под ред. В.Л. Афонина. – М.: Машиностроение, 2001. – 256 с.

3. Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою.- Кіровоград, 2004. - 449с.
4. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: у 3-х част. Під ред. Ю.М. Кузнєцова. Навч. посібник для ВНЗ. – Кіровоград, 2003 р.
5. Bing Li . Xiaoping Hu . Hao Wang. Analysis and simulation for a parallel drill point grinder. Part 2: grinding kinematic modeling and simulation // Int J Advanced Manufacturing Technology (2006) 30: P.221–226.
6. Н. А. Грек, А. Г. Ивахненко, О. Н. Подленко. Моделирование формообразования на станках с параллельной кинематикой // Информатика и системы управления. – 2005. – № 1(9). – С.34 – 40.

Одержано 20.12.2008 р.